

## РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗА В ЭЖЕКЦИОННОЙ ТРУБЕ ВЕНТУРИ

Канд. техн. наук, доц. БРАТУТА Э. Г., кандидаты техн. наук  
КОВАЛЕНКО Ю. Л., МАНЖАЙ В. П.

Харьковский ордена Ленина политехнический институт имени В. И. Ленина

Эжекционная труба Вентури (ЭТВ), работающая с использованием вскипающей воды в качестве рабочего тела, предназначена для транспортировки и очистки от мелкодисперсной пыли технологических газов. Описание экспериментальной установки ранее было представлено в работе [1], а принципиальная схема ЭТВ показана на рис. 1. Она состоит из конфузора 1, камеры смещения 2 и диффузора 3. Вскипающая вода подается в ЭТВ через сопло Лавала 4, установленное в верхней части конфузора соосно потоку запыленного газа. Принцип действия аппарата основан на использовании механической энергии пароводяной струи, выходящей из сопла Лавала с большой скоростью. В камере смещения осуществляется интенсивный процесс тепло- и массообмена между диспергированной жидкостью и запыленным газом, в результате которого происходят осаждение частиц пыли на каплях, передача части энергии пароводяной струи газу, необходимой для его транспортировки.

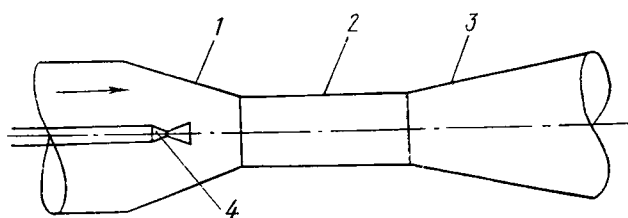


Рис. 1. Принципиальная схема ЭТВ

Метод расчета и оптимизации гидродинамических параметров представлен в [2]. В [3] рассмотрена физическая модель процесса очистки газа при наличии паровой фазы в очищаемом газе. Однако к настоящему времени в литературе отсутствуют основы расчета и систематизированные результаты исследований, позволяющие судить о процессе очистки газа в аппаратах подобного типа.

Последнее обусловлено рядом особенностей работы и конструкции ЭТВ. Отличие рассматриваемого аппарата от известных гидродинамических систем очистки — использование пароводяной смеси вместо диспергируемой жидкости, высокие ее скорости на входе в камеру смещения, значительно превышающие скорость газа. Поскольку одним из способов получения высокоскоростной пароводяной смеси является использование вскипающей воды, процесс образования дисперсной фазы заметно отличается от случаев, когда жидкость дробится в результате гидродинамического взаимодействия с газовой фазой. Это, в частности, исключило возможность применить для описания дисперсного состава капель в ЭТВ ряд известных эмпирических зависимостей, обычно рекомендуемых к использованию в расчетах труб Вентури [4].

В настоящем исследовании сделана попытка разработать математическую модель процесса очистки газа в ЭТВ применительно к отходящим газам мартеновской печи с учетом отмеченных особенностей ее работы. При этом будем считать, что частицы практически не осаждаются в каплеуловителе, степень очистки запыленного газа в установке определяется процессом осаждения пыли на каплях в трубе Вентури, основную роль в пылеулавливании играет инерционное осаждение.

Для расчета степени очистки запыленного газа разобьем камеру смещения по длине на  $m$  участков длиной  $\Delta L$ , достаточно коротких для того, чтобы считать свойства многофазного многокомпонентного потока на протяжении каждого из них постоянными, а всю функцию распределения капель по размерам — на  $n$  интервалов  $\Delta d_i$  для каждого из которых имеется некоторый средний диаметр капли  $d_{ki}$ .

Тогда известное выражение [5] для определения степени очистки запыленного газа применительно к полидисперсному составу капель можно представить в виде

$$\eta = 1 - \exp \left( -1,5 \sum_{j=1}^{j=m} \frac{1}{w_{rj}} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\varepsilon_{ij} q_{ij} |w_{ki} - w_{rj}| \Delta L}{d_{ki} m} \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент инерционного осаждения, определяемый в виде функции критерия Стокса;

$i$  и  $j$  — номера интервалов разбиения функции распределения капель по размерам и длины  $L$  камеры смещения;

$w_r, w_k$  — скорости газа и капель;

$q$  — удельный расход воды.

Таким образом для определения  $\eta$  из уравнения (1) необходимо на каждом  $j$ -м шаге по длине камеры смешения решить систему уравнений, описывающих процесс движения полидисперсной системы капель в потоке запыленного газа.

В основу указанной системы уравнений положены следующие допущения: к моменту входа в камеру смешения капли равномерно распределяются по сечению аппарата и имеют скорость, равную значению среднеимпульсной скорости пароводяной смеси на срезе сопла; течение газа и дисперсной среды одномерно; взаимодействие между каплями не оказывает влияния на кинематику дисперсной среды и процесс тепло- и массообмена; скорость пара, образующегося при испарении капли, равна скорости газа; из всех сил, действующих в общем случае на каплю в потоке газа, будем учитывать лишь силу аэродинамического сопротивления; температуру капли будем считать инвариантной по отношению к ее радиусу; изменением давления по длине камеры смешения пренебрегаем.

Тогда, с учетом перечисленных допущений, на каждом шаге по длине камеры смешения указанная система уравнений принимает вид

$$\frac{dw_k}{d\tau} = - \frac{3\rho_r c_{fi}}{4\rho_{ki} d_{ki}} (\omega_{ki} - \omega_r)^2; \quad (2)$$

$$G_{\Pi i} = Nu_{\Pi i} D (p_{ki} - p_{\infty}) \Pi d_{ki} N_{\Pi i}; \quad (3)$$

$$Q_i = Nu_i \lambda_r (t_r - t_{ki}) \Pi d_{ki} N_{\Pi i}; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} i_{ki} \rho_{ki} \frac{\Pi d_{ki}^3}{6} N_{ki} + i_{\Pi} G_r d + G_r i_r = \text{const}; \quad (5)$$

$$G_r + G_{\Pi} = \rho_{\Pi r} F_{\text{кв}} \omega_{\Pi r}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} N_{ki} M_{ki} + G_r d = \text{const}, \quad (7)$$

где  $c_f$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;

$Nu$ ;  $Nu_{\Pi}$  — критерии Нуссельта для процессов тепло- и массообмена;

$p_{ki}$ ;  $p_{\infty}$  — парциальное давление водяных паров на поверхности и вдали от капли;

$Q_i$  — поток теплоты;

$N_{\Pi i}$  — число капель, находящееся в  $j$ -м интервале разбиения по длине камеры смешения;

$D$  — коэффициент диффузии;

$F_{\text{кв}}$  — площадь сечения камеры смешения.

В [6] было показано, что функция распределения объемов капель по диаметрам при адиабатном истечении вскипающей воды из каналов, имеющих профиль сопел Лавала, может быть представлена в виде

$$v(d_k) = \frac{2}{3\Pi} \alpha^4 d_k^3 k_1(\alpha d_k), \quad (8)$$

где  $\alpha$  — параметр дисперсности, который на основании опытных данных [6] можно записать как

$$\alpha = 0,068 t_{\text{в0}} - 177; \quad (9)$$

$k_1(\alpha d_k)$  — функция Бесселя первого порядка второго рода мнимого аргумента.

Уравнением (8) замыкается система (2) — (7).

Известно, что в ряде случаев используется прием, когда реальная функция распределения заменяется неким условным монодисперсным составом. При этом эквивалентным диаметром считают так называемый заоторовский диаметр

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i d_i^2}. \quad (10)$$

Такое допущение приводит к заметному упрощению решаемой задачи. В связи с этим представляет интерес сравнение результатов определения степени очистки запыленного газа, полученных с учетом этого допущения и без него. Для корректности сравнения величину  $d_{32}$ , использованную в расчете, можно после несложных преобразований представить в виде

$$d_{32} = 3\Pi/4\alpha.$$

При введении допущения о монодисперсном составе капель представленные выше уравнения (2) — (7) принимают вид:

$$\eta = 1 - \exp \left( -1,5 \sum_{j=1}^{j=m} \frac{q_j \varepsilon_j |\omega_{kj} - \omega_r| L}{\omega_r j d_{kj} m} \right); \quad (11)$$

$$\frac{d\omega_k}{d\tau} = - \frac{3\rho_r c_f}{4\rho_k d_k} (\omega_k - \omega_r); \quad (12)$$

$$G_n = Nu_d D (p_k - p_\infty) \Pi d_k N_k; \quad (13)$$

$$Q = Nu \lambda_r (t_r - t_k) \Pi d_k N_k; \quad (14)$$

$$i_k \rho_k \frac{\Pi d_k^3}{6} N_k + i_n G_r d + G_r i_r = \text{const}; \quad (15)$$

$$G_r + G_n = \rho_{nr} F_{rc} \omega_{nr}; \quad (16)$$

$$N_k M_k + G_r d = \text{const}. \quad (17)$$

Для реализации математической модели для каждого участка разбиения по длине камеры смешения на ЭЦВМ ЕС-1020 численным методом решалась приведенная система уравнений. Пример результатов расчета при запыленности газа на входе в аппарат  $z_1 = 4 \text{ г/м}^3$  представлен на рис. 2 в сопоставлении с результатами экспериментальных исследований опытной газоочистки с ЭТВ.

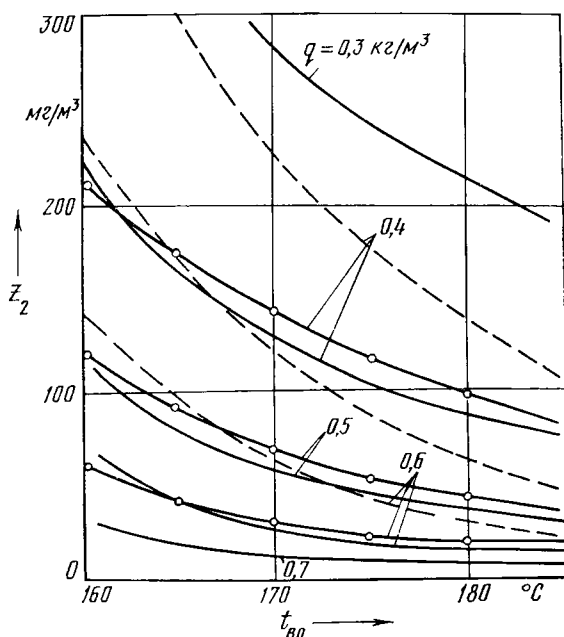


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические значения:

— — — расчет в предположении о монодисперсной структуре капельного потока; ——— расчет с учетом функции распределения капель по размерам; —О— экспериментальные данные. Средняя пунктирная линия —  $q = 0,3 \text{ кг/м}^3$

Как следует из рисунка, достигнуто удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных, полученных с учетом функции распределения капель по размерам. Максимальное рассогласование при этом не превышает 15 % от экспериментальных значений.

Следует отметить значительное расхождение результатов экспериментальных и численных исследований, полученных с использованием допущения о монодисперсной структуре капельного потока. Максимальное рассогласование достигло 80 %.

Представленные результаты позволяют сделать вывод об адекватности результатов, полученных путем экспериментальных и численных исследований, проведенных с учетом реальной функции распределения капель по размерам. Это дает возможность рекомендовать разработанную методику расчета для использования в дальнейших работах, посвященных вопросам оптимизации процесса очистки газа в ЭТВ.

Результаты, представленные на рис. 2, позволяют определять степень очистки запыленного газа в ЭТВ при различных значениях удельного расхода и начальной температуры вскипающей воды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каненко Г. М., Коваленко Ю. Л., Черепинский М. М. Установка газоочистки с эжекционной трубой Вентури.— Экспресс-информация. Черная металлургия, сер. 20, 1980. Вып. 20, с. 3—5.

2. Братута Э. Г., Каненко Г. М., Коваленко Ю. Л. Исследование эжекционной трубы Вентури, работающей с использованием вскипающей воды.— Изв. вузов СССР — Черная металлургия, 1983, № 6, с. 117—120.

3. Резниченко И. Г. Высокоскоростной струйный аппарат для подготовки и очистки газов, отходящих от сталеплавильных печей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Днепропетровск, 1984.— 20 с.

4. Мурашкевич Ф. И. Некоторые вопросы теории улавливания частиц в турбулентном промывателе.— М., 1958.— 53 с.

5. Кропп Л. И., Акбрут А. И. Золуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях.— М.: Энергия, 1977.— 160 с.

6. Братута Э. Г., Ивановский А. Ю. Диспергирование вскипающей жидкости — Энергетическое машиностроение, 1982. Вып. 33, с. 87—90.

Представлена кафедрой  
общей теплотехники